



Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID-19. The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect, the company's public news and information website.

Elsevier hereby grants permission to make all its COVID-19-related research that is available on the COVID-19 resource centre - including this research content - immediately available in PubMed Central and other publicly funded repositories, such as the WHO COVID database with rights for unrestricted research re-use and analyses in any form or by any means with acknowledgement of the original source. These permissions are granted for free by Elsevier for as long as the COVID-19 resource centre remains active.

MakAir, un ventilateur né de la pandémie COVID-19 conçu grâce à l'impression 3D, le numérique et l'open innovation

MakAir, a COVID-19-born ventilation machine, combining 3D printing design, digital control and open innovation

Pierre-Antoine Gourraud^{a,b,c}
 Mickaël Evenas^c
 Corinne Lejus-Bourdeau^d
 Baptiste Jamin^a
 Gabriel Moneyron^a
 Quentin Adam^a
 François Charbon^e
 Claude Guerin^e
 Laurent Argaud^e
 Erik Huneker^a
 Marc Julien^a
 Nicole Rakotoarison^f
 Antoine Roquilly^{b,d}
 Erwan L'Her^{g,h}
 Makers for Life^a

^aCollectif Makers for Life — MakAir, Nantes, France

^bUMR 1064, Inserm, ATIP-Avenir, centre de recherche en transplantation et immunologie, Nantes université, CHU, Nantes, France

^cCIC 1413, Inserm, pôle hospitalo-universitaire 11, Santé publique, clinique des données, CHU de Nantes, Nantes, France

^dService d'anesthésie et de réanimation chirurgicale, Hôtel-Dieu, CHU de Nantes, Nantes, France

^eService de réanimation, hospices civils de Lyon, Lyon, France

^fFaculté de médecine d'Antananarivo, université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar

^gMédecine intensive réanimation, CHRU de la Cavale Blanche, boulevard Tanguy-Prigent, 29609 Brest cedex, France

^hLATIM Inserm UMR 1101, université de Bretagne occidentale, Brest, France

RÉSUMÉ

La récente pandémie de COVID-19 a révélé la nécessité de produire en masse des ventilateurs pour les patients en syndrome de détresse respiratoire aiguë afin de couvrir les graves déficits de matériels liés à l'afflux anormalement élevé de patients dans les services de réanimation. MakAir est un ventilateur mécanique conçu grâce au recours à l'impression 3D et l'open-source logiciel et matériel. Facile à produire en masse, il est destiné aux pandémies de type COVID-19. Pour faciliter sa production en temps de crise, la version minimale du dispositif médical de classe IIb MakAir fonctionne uniquement en pression contrôlée avec une turbine lui permettant d'être autonome en air. Une source d'oxygène (O₂) externe permet d'insuffler un mélange allant jusqu'à 0,8 d'O₂ en fraction d'air inspiré. Le MakAir a fait l'objet d'une évaluation préclinique complète sur banc d'essai. Le MakAir fournit une assistance ventilatoire conforme à la consigne dans des cas simulés d'insuffisance respiratoire aiguë dans divers scénarios de résistance. Traduit en pression motrice de 10–15 cmH₂O, les consignes de ventilation en pression permettent une bonne approximation du volume courant. De même, le contrôle de l'apport en O₂ par un débitmètre permet d'estimer la FiO₂. Les performances techniques du MakAir sont conformes aux exigences appliquées aux appareils destinés à un usage commercial. Si la mise à disposition de matériel en nombre suffisant ne peut que soulager des équipes sur-sollicitées en période de crise, le MakAir peut constituer une alternative intéressante pour les pays à revenu faible ou modéré. Les caractéristiques du MakAir en open-source permettent également d'améliorer, de développer et de tester en continu, en parallèle et de manière délocalisée plusieurs améliorations technologiques et/ou algorithmiques, voire de produire une déclinaison locale.

© 2020 Société Française de Médecine de Catastrophe. Publié par Elsevier Masson SAS. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

MOTS CLÉS

Ventilateur mécanique
 COVID-19
 Dispositif médical
 Médecine de précision
 SARS-COV-2
 Logiciel libre
 Architecture ouverte

KEYWORDS

Mechanical ventilation
 COVID-19
 SARS-COV-2
 Open-source
 Open-design
 Precision medicine

Auteur correspondant.

P.-A. Gourraud,
 UMR 1064, Inserm, ATIP-Avenir, centre de recherche en transplantation et immunologie, CHU, CHU de Nantes Hôtel-Dieu, Nantes université, 30, boulevard Jean-Monnet, 44093 Nantes cedex 1, France.
 Adresse e-mail :
pierre-antoine.gourraud@univ-nantes.fr

SUMMARY

The recent COVID-19 pandemic revealed the need for mass production of ventilators for patients with severe respiratory failure. MakAir is a mechanical ventilator designed using 3D printing and open-source software and hardware. Easy to mass-produce, it is intended for use in COVID-19 like pandemics. To facilitate its production in times of crisis, the minimal version of the class IIb medical device MakAir, works only in controlled pressure with a turbine allowing it to be air autonomous. An external source of oxygen allows the insufflation of a mixture of up to 0.8 O₂ as a fraction of inspired air. The MakAir has undergone a complete pre-clinical evaluation on a test bench. The MakAir provides ventilation assistance as directed in simulated cases of acute respiratory failure linked in various resistance scenarios. Translated into a motive pressure of 10–15 cmH₂O, the driving pressure ventilation provides a good approximation of tidal volume. In the same way, the control of the oxygen supply by a flowmeter makes it possible to estimate the FiO₂ in the different scenarios tested. The technical performance of the MakAir crisis ventilator is in accordance with the requirements applied to devices intended for commercial use. If the provision of sufficient equipment can only relieve over-stressed teams in times of crisis, the MakAir can be an interesting alternative for low- and middle-income countries. The open-source features of MakAir also make it possible to improve, develop, and test several technological and/or algorithmic improvements, or even to produce a local version.

© 2020 Société Française de Médecine de Catastrophe. Published by Elsevier Masson SAS. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

INTRODUCTION

La pandémie de coronavirus 2019 (COVID-19) a prouvé que nos systèmes de santé modernes peuvent être mis en tension par l'émergence de maladies virales. Établissement, personnels de soins et matériel médical sont alors éprouvés dans des conditions qui sortent des usages normaux. Ces conditions se manifestent souvent en premier par la pénurie de consommables et matériels, pourtant essentiels (masques et les solutions hydro-alcooliques, et lits dans les unités de soins intensifs, appareils de ventilation). Parmi les diverses pénuries d'approvisionnement, les équipements de protection individuelle et les ventilateurs sont les plus critiques, et jusqu'à un million de dispositifs pourraient s'avérer nécessaires rien qu'aux États-Unis [1]. De même, la plupart des consommables ou pièces détachées sont rarement disponibles en quantités suffisantes pour faire face aux usages intensifs requis par une crise ou une catastrophe à l'échelle mondiale. De surcroît, la situation de crise mobilise un spectre de fonctionnalités des machines et de compétences des personnels qui est assez réduit et pourtant ce spectre est difficile à anticiper [2].

À défaut de décompte précis, une modélisation mathématique proposée par Wells et al. estiment à 45 341 ([IIQ] 31 346–62 110) le nombre de machines de ventilation qui pourrait être nécessaire lors d'un pic de l'épidémie de COVID-19 aux États-Unis [3]. Dans de telles conditions, la délicate opération de tri des patients atteints par la pandémie interroge. Quelle offre de dispositifs médicaux requise face à quelle demande ? Comment les techniques ou pratiques nouvellement disponibles comme l'impression 3D, et l'innovation en *open-source* (libre de droits de propriété intellectuelle) changent le rapport de force imposé par la crise [4] ?

Les procédures et délais de sécurité légitimement imposés par les procédures d'évaluation standards sont incompatibles avec les urgences face auxquels la pandémie confronte les décideurs. En temps de crise, les opérations d'ordinaire séquentielles deviennent coextensives : réorganiser la fabrication, mettre en place une production localisée au plus près des besoins et valider un cahier des charges adapté aux besoins des patients. De surcroît, crise ou pas crise, le recours massif

au développement itératif, caractéristique de la prépondérance du numérique dans les innovations contemporaines requiert une agilité que des procédures pensées pour le médicament ou des dispositifs « à définition statique » n'ont pas encore. La tentation de contournement des exigences réglementaires pour sauver des vies peut s'avérer aussi dangereuse que le rigorisme réglementaire qui contribuerait, par la latence d'évaluation, à un rationnement dévastateur, au triage des patients et amplifierait la crise et son lot de conséquences économiques et sociales [5,6]. La crise permet d'envisager un changement de paradigme pour tenir compte de la nécessité de disposer de ventilateurs de source ouverte, robustes, peu coûteux à produire et faciles à déployer.

Au carrefour de la transition vers une économie numérique, tant le contrôle logiciel des dispositifs médicaux que l'utilisation massive de l'impression tridimensionnelle (3D) peuvent apporter des réponses aux défis de la médecine moderne [7]. Il s'agit, dans un monde globalisé, pour les pays à faible revenu et à revenu intermédiaire d'avoir accès à des ventilateurs produits à bas coûts avec l'utilisation de pièces et équipements standards, pour les unités de soins intensifs, mais aussi de conduire un approvisionnement local comme source de robustesse dans la réponse mondiale à une crise pandémique [8]. Le projet MakAir illustre les modalités de réponse à ce défi, car le recours à l'impression 3D conjugue la conception ouverte participative libre de droit de propriété intellectuelle et la perspective de production délocalisée, dans des délais courts. Cette étude présente les principes qui ont présidé à sa conception et l'évaluation préclinique complète sur un modèle de banc d'essai.

MÉTHODES

Une communauté bénévole, mobilisée à distance et une conception accélérée

Un collectif de bénévoles les *makers for life* s'est autoconstitué durant la période de confinement COVID-19 pour contribuer à la conception du ventilateur MakAir en cas de pénurie de

ventilateur en France ou à l'étranger. Chacun a contribué à mesure de son champ d'expertise du choix d'un nom « MakAir = Make Air » (littéralement fabriquer de l'air) à la conception pneumatique du circuit en passant par la constitution du dossier réglementaire recevable par l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM). La version initiale du ventilateur MakAir a été développée entre le 16 mars et le 10 avril 2020 (date de dépôt du dossier d'approbation à l'ANSM) en réponse à la pénurie potentielle de ventilateurs conventionnels au niveau national et mondial. Après plusieurs itérations sur la conception technique et des changements d'algorithme, la première version du prototype dont les résultats sont présentés ici a été testée le 12–14 avril 2020. Le MakAir est conçu comme un dispositif médical classe IIb, en respectant les exigences de la directive européenne du dispositif médical 93/42/CEE. La conception de MakAir a eu massivement recours à l'impression 3D pour développer en parallèle plusieurs types de valves et obtenir itérativement une conception matérielle du MakAir stable. L'utilisation de principes de conception matérielle et logicielle libres de droit, dits en *open-design open-source*, a permis de rassembler une communauté de plus de 350 personnes (*liste en annexe*) qui ont contribué à développer le MakAir (<https://github.com/makers-for-life/makair/>). Un noyau d'environ 20 personnes a organisé des groupes de travail en utilisant des outils d'interaction à distance et l'archivage de documents (<https://makersforlife.slack.com/>).

Précision de la pression motrice générée par la turbine

La précision de la pressurisation a été évaluée par la stabilité de la pression expiratoire positive (PEP) ou *Positive End Expiratory Pressure* (PEEP), la pression de plateau (P_{plateau}), la pression de crête (pic ou pointe), dans un mode contrôlé par la pression (VPC). Aucune respiration spontanée n'est appliquée. Le paramètre central du MakAir est la pression motrice,

différence entre la PEP et la P_{plateau} . La pression est contrôlée en temps réel grâce à un simple capteur de pression dans le circuit pneumatique fermé. Le respect de la consigne d'erreur a été évalué comme étant la différence moyenne entre les valeurs cibles réglées et la valeur réelle mesurée indépendamment. Les évaluations de la PEP ont été comparées pour trois niveaux de résistance : 5, 20 et 50 $\text{cmH}_2\text{O/L/s}$.

Apport d'oxygène à l'aide d'une valve à effet venturi

Dans sa version initiale, MakAir ne comporte ni capteur de débit d'air ni capteur d'oxygène (O_2). Il ne mesure donc pas la fraction inspiratoire d' O_2 ($F_{\text{I}}\text{O}_2$), mais utilise une administration d' O_2 supplémentaire sur la face avant de l'appareil, qui produit un mélange d'air spécifique par effet venturi allant jusqu'à 80 % d' O_2 . Le dispositif venturi à l'intérieur du ventilateur est utilisé pour s'assurer que la quantité correcte de gaz entre dans le système pressurisé, ce qui entraîne une variation de la $F_{\text{I}}\text{O}_2$ et du débit de gaz. Nous n'avons pas testé l'impact du $F_{\text{I}}\text{O}_2$ sur les mesures ; cependant, nous avons mesuré l'impact de l'administration de 15 L/min d' O_2 en utilisant une bouteille d' O_2 standard et un dispositif de débitmètre.

RÉSULTATS

Le MakAir s'organise en deux compartiments plus ou moins isolés en fonction du caisson utilisé (Fig. 1A) :

- le module électronique est situé dans la partie supérieure de l'appareil ; il contient deux batteries au plomb (2h30 d'autonomie), une carte électronique et un écran LCD. Ces composants sont couramment disponibles dans le commerce ;
- le module pneumatique se trouve dans la partie inférieure de l'appareil et contient la turbine, les valves à pincements, ainsi que l'entrée et la sortie de la ventilation. Le circuit

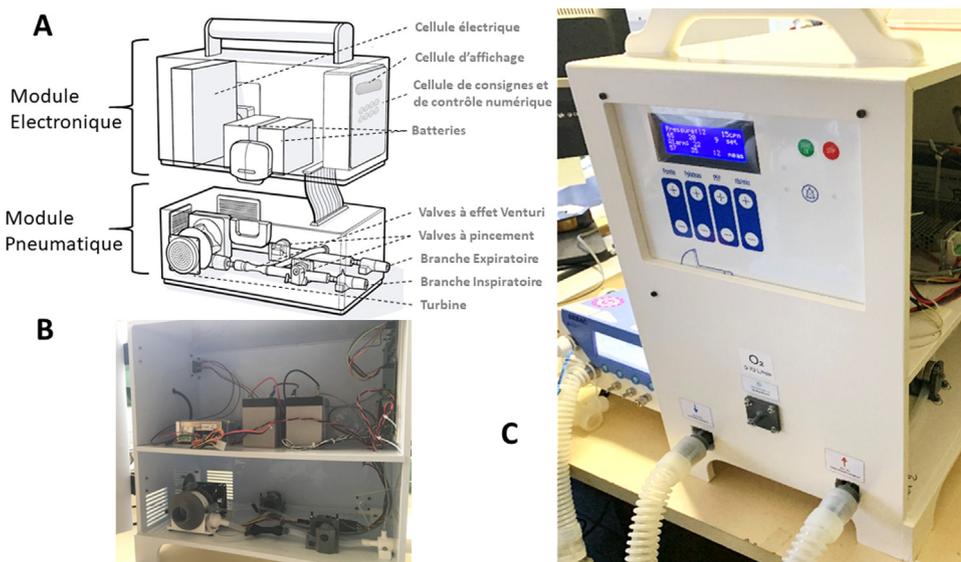


Figure 1. Représentation schématique (A) et photographies du premier prototype d'appareil MakAir (B et C). Détails des matériaux, références et variantes disponibles sur : <https://github.com/makers-for-life/MakAir>.

pneumatique est fermé. La plupart de ces pièces sont imprimées en 3D, à l'aide de matériaux biocompatibles, et tous les plans sont disponibles en *open-source*.

La vue extérieure de l'appareil permet de retrouver ses principales caractéristiques, sa modularité, ainsi que la valve à effet venturi pour assurer le mélange d'O₂ provenant d'une source externe. (Fig. 1B et C).

Au gré des versions logicielles, chaque paramètre de consigne peut être utilisé pour ajuster en temps réel l'ouverture coordonnée des vannes à pincement. La concomitance de la mesure de pression dans le système pneumatique fermé avec l'action sur les vannes traduites dans un angle appliqué au servomoteur permet un contrôle fin du respect de la consigne de pression (pression de crête ici) (Fig. 2). Comme attendu, la qualité de la précision relevée par des coefficients de corrélation linéaire diminue avec l'augmentation de la résistance pulmonaire, sans signification clinique.

Selon l'hypothèse éprouvée dans les premières semaines de la pandémie, l'absence de disponibilité de débitmètre impose par la force des choses, une ventilation en mode pression contrôlée avec de simples capteurs de pression. Cela rend obligatoire la vérification en phase préclinique du MakAir de la bonne équivalence entre pression motrice du cycle et volume inspiratoire dans les multiples scénarios de résistance (Fig. 3). On observe qu'une ventilation avec des pressions motrices entre 10 et 20 cmH₂O correspond à des volumes inspiratoires entre 350 et 550 mL.

L'apport en O₂ est un paramètre facilement ajusté en fonction de la gazométrie sanguine des patients, l'utilisation d'abaques de conversion entre le débit d'O₂ en entrée du MakAir et la FiO₂ (Fig. 4). Elle a été réalisée dans deux centres indépendamment. Elle confirme la possibilité de monter jusqu'à 0,8 de FiO₂ avec un débit de 15 L/min d'O₂.

Ergonomie et maintenabilité sont simplifiées à l'extrême, rendant l'appareil aisé à déployer pendant des longues périodes dans un environnement où les ressources en personnels qualifiés peuvent se faire rares. Les alarmes à seuils automatiques, qui évoluent selon deux niveaux de criticité, sont gérées de façon classique (déclenchement sonore et visuel, arrêt par inhibition ou acquittement). Ces alarmes sont aussi externalisables. Cette option est intéressante dans un souhait de surveillance centralisée, d'accès limité à la chambre du patient ou de son traitement à domicile.

DISCUSSION

Les évaluations précliniques du MakAir, ici présentées en exposant les principes de sa conception, montrent que le dispositif de ventilation en *open-design*, *open-source* est capable de fournir avec précision une assistance ventilatoire dans des cas simulés d'insuffisance respiratoire aiguë liée aux crises pandémiques de type COVID-19. Ses performances techniques précliniques permettent d'envisager avec confiance un essai clinique en situation et peuvent constituer une alternative fiable dans d'autres situations, par exemple pour l'assistance respiratoire chez des patients présentant une mécanique respiratoire normale (par exemple, une défaillance neurologique).

Au-delà de ses performances techniques, le MakAir est un projet hors-normes pour trois raisons :

- des volontaires experts dans leur domaine, mais étranger à la ventilation mécanique en réanimation l'ont conçu en collaboration en quelques semaines en réponse à la pandémie [9] ;

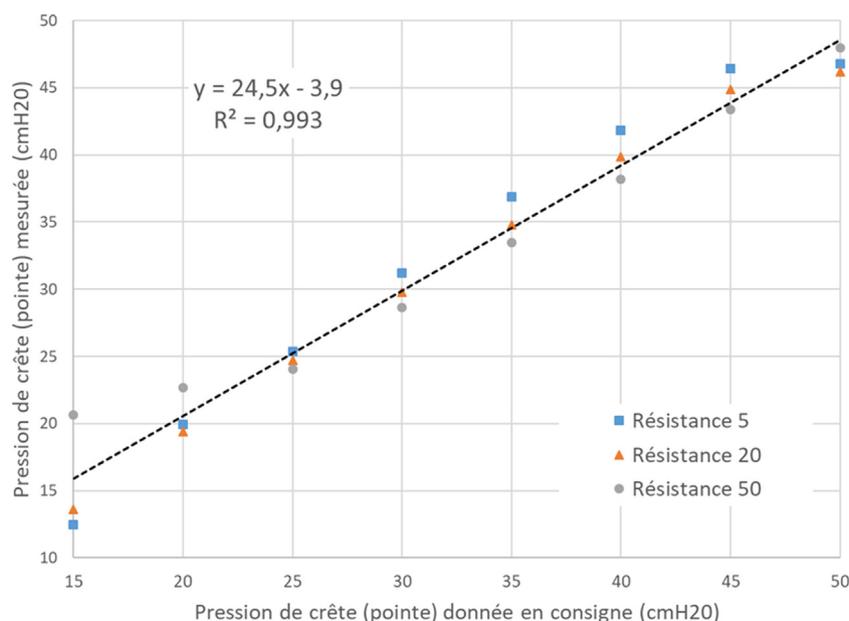


Figure 2. Corrélation entre la consigne de pression de crête et la pression mesurée dans trois niveaux de résistance pulmonaire. Chaque mesure donnée est la moyenne de cinq mesures. Une régression linéaire est présentée pour chaque série de scénario de résistance pulmonaire (les consignes de $P_{Crête}$ entre 15 cmH₂O et 50 cmH₂O sont testées de 5 cmH₂O en 5 cmH₂O).

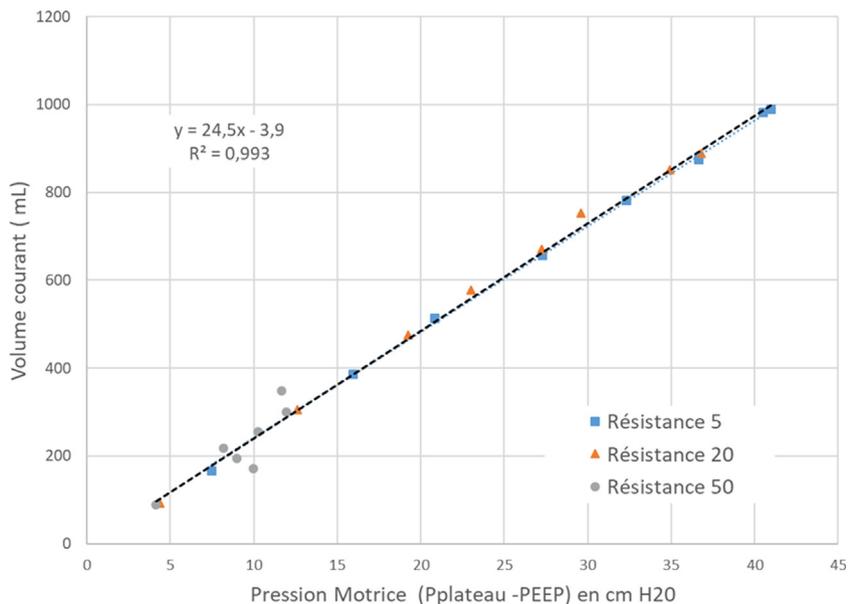


Figure 3. Corrélation entre la pression motrice et le volume inspiratoire dans trois scénarios de résistance pulmonaire. Chaque mesure donnée est la moyenne de cinq mesures. Une régression linéaire a été effectuée pour chaque série de scénario de résistance pulmonaire, seule la régression globale est présentée (les consignes de pression motrice [définie par la soustraction $P_{\text{plateau}} - \text{PEEP}$] entre 2 cmH_2O et 42 cmH_2O).

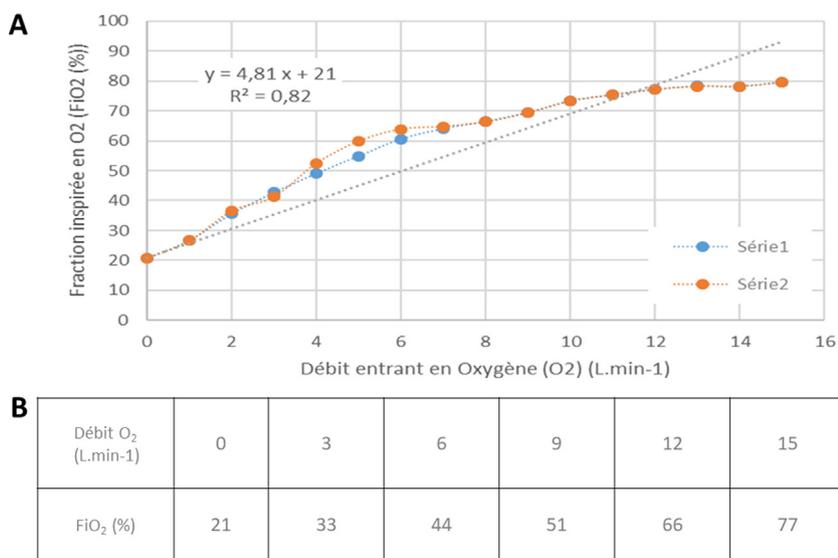


Figure 4. Relation entre le débit entrant d' O_2 du MakAir et la FiO_2 . A. Deux essais indépendants de conversion de débit d' O_2 en FiO_2 pour une ventilation à $\text{PEP} = 9 \text{ cmH}_2\text{O}$, $P_{\text{plateau}} = 17 \text{ cmH}_2\text{O}$, $V_t = 250 \text{ mL}$ et résistance = $10 \text{ cmH}_2\text{O/L/s}$ (centre 1). B. Mesure par Certifier Fa+, de la correspondance entre débit entrant d' O_2 et FiO_2 pour une ventilation à $\text{PEP} = 10 \text{ cmH}_2\text{O}$, $V_t = 400 \text{ mL}$ et compliance = $40 \text{ mL/cmH}_2\text{O}$ et résistance = $10 \text{ cmH}_2\text{O/L/s}$ (centre 2).

- il est le premier de son genre en tant que dispositif médical dont le développement a reposé sur une logique libre de droits de propriété intellectuelle et pouvant être validé par les autorités de régulations. Ses composants biocompatibles sont d'un coût abordable partout dans le monde et possiblement imprimés en 3D. Il peut donc constituer une

- ressource majeure en cas de besoins lors d'une pandémie ou d'une catastrophe tout autant qu'il représente une possible opportunité pour les pays à revenu faible ou moyen ;
- il illustre la part croissante prise par les logiciels dans le développement des dispositifs médicaux, car les mesures et les actions sont asservies par des boucles algorithmiques.

La communauté *Makers for life* et le MakAir

Le fonctionnement du projet est hors-normes dans le domaine médical, le collectif *Makers for Life* est un cas d'application des méthodes de travail des *start-up*. Dans son approche de résolution d'un problème (une éventuelle pénurie de respirateurs), il s'apparente à un *hackathon* de 3 semaines d'ailleurs, impulsé par un groupe d'entrepreneurs en étroite coordination avec le monde académique : le CEA, une université et un hôpital universitaire de Nantes. Sur le plan de la propriété intellectuelle, le projet est marqué par un engagement sine qua non pour concevoir un ventilateur mécanique *open-source*. Sur le plan managérial, la gestion d'un groupe dont l'effectif croît exponentiellement correspond aussi aux références du monde des *start-up* ou du monde militaire plus que celui de la recherche clinique : au 8 avril 2020, plus de 250 volontaires avaient rejoint le projet. De plus, sa chronologie accélérée est à l'image d'une mobilisation en temps de crise : le respirateur MakAir aura été conceptualisé en trois jours, testé sur animal en trois semaines et trois mois d'évaluation et procédures (seulement) aboutissent aux lancements des essais cliniques sur l'homme. Le projet porte aussi une dimension industrielle nouvelle avec des versions de logiciel pilotant la machine qui rendent possible la conception de nouvelles fonctionnalités techniques sans changer la configuration matérielle. Enfin, dans sa dimension extranationale, le ventilateur MakAir présente plusieurs intérêts pour des pays à revenus modérés : son caractère minimaliste satisfait les besoins spécifiques pour l'assistance ventilatoire prolongée d'un patient SARS-Cov-2, et ses fonctionnalités réduites le laissent maniable pour de personnels fatigués et insuffisants.

CONCLUSION

Le MakAir est un appareil de ventilation issu du numérique et de l'impression 3D comme une nouvelle génération de dispositif médical validé comme tel qui semble fiable, facilement abordable et déployable en période de pandémie. Le développement collaboratif à bas coût, permis par l'*open-source*, peut également aider les pays, à revenu faible ou modéré, à accéder à une meilleure diffusion de matériel médical. Les caractéristiques de l'*open-source* et les conditions de développement collaboratif du dispositif permettent en outre, d'améliorer, de développer et de tester plusieurs améliorations technologiques et/ou algorithmiques au sein de laboratoires institutionnels, de *spin-offs* et de *start-ups*.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement Jean Therme et Emmanuel Sabonnadière pour le soutien dès le début du projet ; Maud Plombas et Cyrille Michaud de l'équipe de réglementation ; Emmanuel, Elliott, Cherin, Pierre, Clément, Vincent, Valérian pour leur soutien technique ; Morgane Soulard et Sandra Roze de l'équipe de sourcing ; Volodia Lepron et Bruno Renard pour la logistique ; les équipes de Clinatex et de ONIRIS ainsi que les Drs R. Briot et D. Anglade pour les essais précliniques ; les professeurs Karim Asehounne, Françoise Roux et Jack-Yves Deschamps ainsi que le service de soutien à la recherche clinique du CHU de Nantes pour leur engagement dans la phase d'essais cliniques du MakAir. Cette recherche a été financée par l'Agence française d'innovation pour la défense (AID) (subvention n° COVID-19-1544337), la fondation de l'université de Nantes, le fonds de dotation du CHU de Nantes. Il a reçu le soutien des régions Pays de

Loire et Auvergne Rhône-Alpes, de la métropole de Nantes, et du CEA (LETI).

Déclaration de liens d'intérêts

E. L'her est co-fondateur de Oxynov Inc (Canada) et consultant pour Smiths, Sedana Medical, GE Healthcare.

P.A. Gourraud est le fondateur (2008) (www.methodomics.com) et le co-fondateur de Wedata (2018) (www.wedata.science). Il est consultant pour de grandes entreprises pharmaceutiques, toutes traitées par des réseaux universitaires (Mérieux, Biogen, Merck, Methodomics, WeData, Boston Scientific, AstraZeneca, Cook). Il n'a aucune activité de prescription de médicaments ou d'appareils.

Les autres auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

ANNEXE 1. LA COMMUNAUTÉ MAKER FOR LIFE

Quentin Adam, « Clever Cloud » ; Mathias Adam, « Freelance » ; Claire Alberti, « Cea » ; Olivier Ami, « Altrnativ.Care » ; Karim Ashenoune, « université de Nantes » ; Johanne Auclair, « Dicidesign » ; Vincent Aucouturier, « Groupe Atlantic » ; Claude-Eric Bahuaud, « Airbus » ; Julien Bajolet, « Ipc » ; Olivier Balavoine, « Airbus » ; Anne-Lise Bance, « Prophit » ; Noel Barbu, « université de Nantes » ; Arthur Bardinnet, « Airbus » ; Laure Barrière, « Freelance » ; David Baud, « Ipc » ; Arnaud Bauer, « Orange business service » ; Frédéric Becel, « Air France » ; Jean Luc Béchenec, « université de Nantes » ; Nicolas Bedouin, « Cea » ; Flavien Begnon, « 3Dnewprint » ; Aicha Ben Dhia, « M.I.T. » ; Maxime Bernard, « Groupe Atlantic » ; Stéphane Bernier, « Tronico » ; Christelle Bervas, « université de Nantes » ; Aurélien Bignon, « Biom Advice » ; Aurélie Bineau, « université de Nantes » ; Christophe Bizot, « Renault » ; Romain Blanc, « Diabeloop » ; Antoine Bocquého, « Studiho » ; Mathieu Boidot, « Cea » ; Sébastien Boisseau, « Cea » ; Philippe Boizard, « Tronico » ; Olivier Bonneau, « Indépendant » ; Edouard Bonnefous, « Zodiac Aerospace » ; Samuel Bonnet, « université de Nantes » ; Jean-Christophe Borneat, « Ct-lpc » ; Ana Botelorenzo, « Safran » ; Pauline Boudant, « université de Nantes » ; Papalu Bougalis3D, « Indépendant » ; Quentin Bouquin, « Qb Maker » ; Nicolas Bouquin, « Tronico » ; Jessie Bourcier, « CHD Vendée » ; Alexandre Bourdiol, « Philips » ; Camille Bourgain, « Oxygen — Rp » ; Edyta Bourgeois, « Tronico » ; Fanny Bouton, « 1 000 110 » ; Sébastien Boutruche, « Groupe Iliad » ; Michael Bouvier, « Cabot » ; Olivier Breillacq, « Wedata » ; Xavier Brochet, « Ct-lpc » ; Mickaël Brosset, « Tronico » ; Frédéric Bruet, « Dga » ; Romain Bustos, « Diabeloop » ; Daniele Caltabiano, « Stm » ; Julien Calvignac, « Sirehna » ; Meyha Camara, « Freelance » ; Yildiz Caprak, « Renault » ; Yannick Castel, « Armor » ; Jean-Philippe Cesbron, « École de design de Nantes » ; Alain Chambron, « Cea » ; Maureen Champeau, « Clever Cloud » ; Guillaume Champeau, « Qwant » ; Thierry Chantier, « Semarchy » ; Ewen Chardonnet, « Makery » ; Jean-Marc Charlot, « Audencia » ; Patrick Charriot, « Groupe Iliad » ; Bruno Charrat, « Cea » ; Matthieu Charron, « Teester » ; Guillaume Charvet, « Cea » ; Matthieu Chatry, « Le Chaudron » ; Claire Chauveau, « Diabeloop » ; Christine Chauveau, « université de Nantes » ; Patrice Chauveau, « CHU de Nantes » ; Thibault Chevalier, « Le Palace » ; Anne Chiffolleau, « CHU de Nantes » ; Loïc Chimot, « clinique Breteche » ; Samy Chouial, « Cesame » ; Dean Clark, « Airbus » ; Laurent Clavelier, « Cea » ; Stéphane Cohan, « Naoned

Makers » ; Patrick Collet, « Tronico » ; Xavier Coponet, « Le Club Sandwich Studio » ; Pierre Coste, « Cea » ; Paul Couderc, « Le Club Sandwich Studio » ; Gaelle Coudray, « université de Nantes » ; Thibault Cretinon, « Maatel » ; Arthur Dagard, « Groupe Iliad » ; Steven Daix, « Extia » ; Sébastien Dauve, « Cea » ; Marian De Bonis-Hamelin, « Hp » ; Catherine De Charette, « université de Nantes » ; Séverine De Gaudemont, « Saponaire Consulting » ; François De Martrin-Donos, « Intuitive » ; Gautier De Saint Martin, « Jabby Technologies » ; Sabine De Soyres, « université de Nantes » ; Marie-Charlotte De Vinzelles, « Tronico » ; Christophe Debard, « Airbus » ; Frédéric Degouzon, « École de design de Nantes » ; Christel Deguet, « Cea » ; Antoine Delarche, « Airbus » ; Christian Delcher-Pinas, « Airbus » ; Cyril Delva, « Ci Electronics » ; Louis Delvaux, « Wedata » ; Thomas Demoulinger, « Airbus » ; Sylvain Denoux, « Naval Group » ; Magalie Déramé, « Tronico » ; Marc Desbois, « Michelin » ; Christophe Deslile, « Renault » ; Mickael Desmoulin, « Renault » ; Philippe Desplats, « Dirupt » ; Alain Di Donato, « Inp Grenoble » ; Cédric Doutriaux, « université de Nantes » ; Freddy Drouet, « Tronico » ; Amélie Dubois, « Iade — Nantes » ; Jean-François Dubos, « Imanens » ; François Dupont, « Ct-lpc » ; Matthieu Duval, « Duval » ; Théo Duvernay, « Babyprogress » ; Marie Ekeland, « Daphni » ; Vincent Entzmann, « Cea » ; Maxime Eolien, « Freelance » ; Alan Eon, « Altran » ; Olivier Estruc, « CHU De Nantes » ; Mickael Evenas, « CHU De Nantes » ; Adrien Farrugia, « Steadxp » ; Emmanuel Feller, « Clever Cloud » ; Bertrand Fillon, « Cea » ; Hugues Floch, « Groupe Iliad » ; Djyp Forest Fortin, « O'Clock » ; Justine Fouille, « Freelance » ; David Fraisse, « Groupe Iliad » ; François Frassati, « Cea » ; Frédéric Frederic.Pillon, « Stm » ; Benoit Furet, « université de Nantes » ; Frédéric Gaillard, « Cea » ; Alexandre Gallegos, « Diabeloop » ; Mathieu Gallissot, « Cea » ; Guillaume Gallot, « Capacités » ; Clément Garaffa, « Cea » ; Mauricio Garcia Villasenor, « Advanced Design » ; Mathias Gayraud, « Groupe Iliad » ; Kevin Georges, « Ovh » ; Rémi Gerbelot, « Cea » ; Antony Girault, « Squark » ; Nathalie Glatigny, « Babyprogress » ; Mathieu Gonnet, « Biofortis » ; Raphaëlle Gorenbough, « École de design de Nantes » ; Guilherm Goudjil, « Aptatio » ; Charles-Elie Goujon, « Cea » ; Calypso Goulet, « Oxygen — Rp » ; Stéphane Gouret, « École de design de Nantes » ; Pierre-Antoine Gourraud, « université de Nantes » ; Pierre-Arthur Gourraud, « Freelance » ; Xavier Gourraud, « Freelance » ; Claire Goyat, « Entecom » ; Vincent Graillet, « Umanit » ; Jerome Gransard, « Future Electronics » ; Maxime Gratier, « Technico Plast » ; Blaise Gratier, « Technico Plast » ; Hugo Gresse, « Inria » ; Nadia Guery, « Tronico » ; Morgan Guillaudeux, « Wedata » ; Simon Guillochon, « Freelance » ; Anaïs Guinet, « Babyprogress » ; Didier Hanin, « Cea » ; Boris Harle, « Groupe Iliad » ; Jean-Yves Hascoet, « École centrale de Nantes » ; Olivier Henry, « Fablab Plateforme-C » ; Damien Henry, « Bluelab » ; Mathias Herberts, « Senx » ; Florian Hervéou, « Le Palace » ; Thomas Hervouet, « Tronico » ; Yann Heurtaux, « Shalf » ; Fabien Holin, « Semtech » ; Jens Holzer, « Farnell » ; Michel Houdou, « Groupe Oem » ; Stéphane Houssais, « 3Dnewprint » ; Clément Huber, « Navya » ; Léa Huguët, « Ping » ; Erik Huneker, « Diabeloop » ; Dina Ingraio, « Ceritd » ; Alexandre Jaeg, « Airbus » ; Baptiste Jamin, « Crisp Im » ; Christophe Jany, « Cea » ; Alexandre Jarri, « Akka » ; Cécile Jeusset, « Fdi Fixations » ; Céline Josse, « Le Palace » ;

Marc Julien, « Diabeloop » ; Cherine Kamel, « Renault » ; Hana Khelifa, « Ada Tech » ; Cecilia Kroiss, « Diabeloop » ; Alice Labonde, « Farnell » ; Pierre Lalbatry, « Freelance » ; Thierry Lamquin, « Garret Motion » ; Loïc Lannuzel, « Tronico » ; Richard Laucournet, « Cea » ; Sébastien Laurent, « Renault » ; Milan Lazarevic, « CHU de Nantes » ; Jean-Baptiste Le Clec'H, « Makeme » ; Victor Le Comte, « Freelance » ; Frédéric Le Comte, « Dssm » ; Vincent Le Cunff, « Tronico » ; David Le Gall, « Freelance » ; Anne Le Louarn, « CHU de Nantes » ; Régis Le Maulf, « Indépendant » ; Tugdual Le Néel, « École centrale de Nantes » ; Olivier Le Néel, « Stm » ; Glenn Le Nestour, « Ping » ; Katell Le Scannff, « Acommeasure » ; Sylvie Lebeau, « Md101 » ; Patrick Lecallet, « université de Nantes » ; Mélanie Lecaloch, « université de Nantes » ; Adrien Lecharpentier, « Cloudbees » ; Thierry Lechevallier, « Roboplanet » ; Sébastien Leclerc, « Freelance » ; Victor Lefebure, « Cea » ; Arnaud Lefebvre, « Clever Cloud » ; Corrine Lejus, « université de Nantes » ; Sébastien Le-Loch, « université de Nantes » ; Arthur Lepoivre, « Irt Jules Verne » ; Volodia Lepron, « Freelance » ; Steven Leroux, « Ovh » ; Arnaud Lescasse, « Freelance » ; Laurence Leterte, « université de Nantes » ; Hugo Letessier, « l'Atelier de la poule noire » ; Yannick Liotta, « université de Nantes » ; Erwan Loisant, « Zendesk » ; Thomas Loubier, « Cea » ; Olivier Lourdao, « Ct-lpc » ; Gildas Loussouarn, « Inserm » ; Rogelio Lozano, « Bladetips Energy » ; Olivier Lugbull, « Tronico » ; Eric Maillard, « Spin-Off Conseil » ; Pierre Malige, « université de Nantes » ; Frédéric Malleret, « Aerowestdevelopment » ; Louis Manhes, « Freelance » ; Jean-Christophe Maran, « Aimerging Health Sas » ; Virginie Marchand, « Tronico » ; Daniel Marhely, « Er-Capital » ; Yannick Marietti, « Stm » ; Adrien Martiniere, « Ping » ; David Mazo, « Hp » ; Martial Medjber, « Aptatio » ; Olivier Menard, « Cea » ; Alain Menponteil, « Cea » ; Vincent Meril, « Oceanet » ; Yohann Mesnildrey, « Jvd » ; Cyrille Michaud, « Md101 » ; Adrien Mithalal, « Physio-Assist » ; Alexandre Modesto, « Covage » ; Gabriel Moneyron, « Cooprint » ; Martin Monika, « Freelance » ; Véronique Montoya, « Farnell » ; Kevin Morin, « Code Lutin » ; Gaël Musquet, « H4CK3R » ; Elie Namias, « Diabeloop » ; Yohann Nédélec, « Wedata » ; Sébastien Nedjar, « université d'Aix-Marseille » ; Clément Niclot, « Rtsys » ; Jennifer Ogor, « Asi » ; Anne Omnes, « CHU de Nantes » ; Marc Ordiali, « Groupe Iliad » ; Yannick Ouvrard, « université de Nantes » ; Georges Pagis, « Mg-Tech Handling » ; Pierre Papin, « Senx » ; Cedric Papon, « Parrot » ; Edouard Patout, « Groupe La Poste » ; Julien Paugam, « École de design de Nantes » ; Maxime Pawlak, « Selfcity » ; Michel Pellat, « Cea » ; Marc-Antoine Perennou, « Clever Cloud » ; Marc Peron, « université de Nantes » ; Nellya Perrot, « Freelance » ; Christophe Pezet, « Pezet Sas » ; Lou Philippe, « université de Nantes » ; Mariette Phulpin, « Le Palace » ; Benjamin Picard, « Maatel » ; Damien Picard, « université de Nantes » ; Cécile Pierres, « CHU de Nantes » ; Brendan Pilard, « Capacités » ; Frédéric Pillon, « Stm » ; Dominique Pinoit, « Ct-lpc » ; Frédérique Pinson, « université de Nantes » ; Jean-François Pintos, « Cea » ; Evelyne Piot, « Farnell » ; Maxime Pitussi, « Audencia » ; Laurent Pivard, « Ct-lpc » ; Gabriel Plassat, « la fabrique des mobilités » ; Maud Plombas, « Diabeloop » ; Damien Plombas, « Diabeloop » ; Pierre-Antoine Pluvinage, « Armor » ; Brice Poirier, « Cea » ; Carine Poussibet, « Scopeli » ; Jérôme Prouvee, « Cea » ; Samuel Pujol,

« Qwant » ; Lorette Queguiner, « université de Nantes » ; Florian Quéméneur, « Tronico » ; Sebastien Quenard, « Cea » ; Prince Ramahefa-Andry, « Cea » ; Haritiana Rasolo, « université de Nantes » ; Cécile Ravaux, « Maker Faire France » ; Alexandra Reneleau, « Freelance » ; Jacques Reverdy, « Cea » ; Valéry-Pierre Riche, « CHU de Nantes » ; Patrick Robin, « Arrow Electronics » ; Jaime Rodrigues, « Ipc » ; Antoine Roquilly, « université de Nantes » ; Edouard Rosset, « Parrot » ; Paul Rouits, « Groupe Iliad » ; Anne Roule, « Cea » ; Julien Routin, « Cea » ; Emmanuelle Rouvière, « Cea » ; Jean-Claude Royer, « Cea » ; Anne Royer-Moes, « CHU de Nantes » ; Sandra Roze, « Tronico » ; Christophe Roze, « Renault » ; Laurence Salaun, « CHU de Nantes » ; Valerian Saliou, « Crisp Im » ; Eduardo Sanjurjo, « Ge Renewable Energy » ; Jeremy Saudrais, « Ge Offshore Wind Nantes » ; Sophie Schmidlin, « Renault » ; Thomas Schmitt, « Freelance » ; Guillaume Seychal, « Michelin » ; David Sferruzza, « Le Palace » ; Julien Singer, « Freelance » ; Clément Sommelet, « Zenly » ; Nicolas Sornin, « Semtech » ; Morgane Soulard, « Tronico » ; Aymeric Sperandio, « Cea » ; Weronika Spiewak, « 3Ds » ; Ludovic Tampere, « Camfil » ; Julien Tanguy, « Valwin » ; Gabriel Tapia, « Partage3D » ; Alexandre Teulle, « Cea » ; Gregory Thibord, « Le Palace » ; Olivier Tosoni, « Cea » ; Sandrine Toupin, « Tronico » ; Stéphane Touze, « École centrale de Nantes » ; Hugues Touzot, « Dicidesign » ; Francky Trichet, « université de Nantes » ; Damien Turlay, « Renault » ; Mauro Turrini, « université de Nantes » ; Luc Uytterhaeghe, « Ipc » ; Ines Vallet, « université de Nantes » ; Emmanuel Vanoli, « 3Ds » ; Adeline Viaud, « Freelance » ; Auriane Vicente, « Freelance » ; Luciano Vidal, « École centrale de Nantes » ; Elliott Vincent, « Crisp Im » ; Denis Vincent, « Cea » ; Kevin Volant, « université de Nantes » ; Philippe Weidman, « Macdermid Alpha France Sas ».

RÉFÉRENCES

- [1] Ranney ML, Griffith V, Jha AK. Critical supply shortages – the need for ventilators and personal protective equipment during the COVID-19 pandemic. *N Engl J Med* 2020;382:e41. doi: [10.1056/NEJMp2006141](https://doi.org/10.1056/NEJMp2006141).
- [2] L'Her E, Roy A. Bench tests of simple, handy ventilators for pandemics: performance, autonomy, and ergonomics. *Respir Care* 2011;56:751–60.
- [3] Wells CR, Fitzpatrick MC, Sah P, Shoukat A, Pandeye AA, El-Sayed AM, et al. Projecting the demand for ventilators at the peak of the COVID-19 outbreak in the USA. *Lancet Infect Dis* 2020. doi: [10.1016/S1473-3099\(20\)30315-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30315-7) [S1473-3099(20)30315-7. Article sous presse].
- [4] Truog RD. The toughest triage – allocating ventilators in a pandemic. *N Engl J Med* 2020;382:1973–5.
- [5] BBC News. Dyson COVID-19 ventilators are "no longer required"; 2020 [Consulté le 29 avril 2020. Disponible sur : <https://www.bbc.com/news/business-52409359>].
- [6] France TV Infos. Coronavirus, 8500 respirateurs artificiels ont-ils été fabriqués pour rien ?; 2020 [Consulté le 29 avril 2020. Disponible sur : https://www.francetvinfo.fr/sante/maladie/coronavirus/coronavirus-8500respirateurs-artificiels-ont-ils-ete-fabriques-pour-rien_3930273.html].
- [7] Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nat Med* 2019;25:44–56.
- [8] Hopman J, Allegranzi B, Mehtar S. Managing COVID-19 in low and middle-income countries. *JAMA* 2020;323:1549–50.
- [9] Frazer JS, Shard A, Herdman J. Involvement of the open-source community in combating the worldwide COVID-19 pandemic: a review. *J Med Eng Technol* 2020;13:1–8. doi: [10.1080/03091902.2020.1757772](https://doi.org/10.1080/03091902.2020.1757772).